

Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter«.

Zusätzlich empfiehlt sich in sensiblen Bereichen die permanente Überwachung zwischen den Potentialen PE und PB, bzw. dem PE und dem FB (Funktionspotentialausgleichsleiter) an zentralen Stellen mit Hilfe von RCM (Differenzstrom-Überwachungsgeräte), die eingestellt auf »verträgliche« Grenzwerte, unverträgliche Differenzströme melden und signalisieren. Damit haben wir ein Überwachungssystem, welches in Leitsystemen eingebunden werden kann, um entsprechende Maßnahmen einzuleiten.

Anmerkung: Neben der Betrachtung der EMV-gerechten Elektroinstallation sind die Bedingungen des Personenschutzes zu erfüllen. Und damit der »Schutz gegen elektrischen Schlag« unter Fehlerbedingungen und heute vorrangiger automatischer »Abschaltung der Stromversorgung« nach DIN VDE 0100-410:6-2007.

Fazit

Das störungsfreie Zusammenwirken aller Geräte ist die Aufgabenstellung der Zukunft. Deshalb ist die Kenntnis der

MEHR INFOS:

Fachbeiträge zum Thema
 Budde, G.: Vagabundierende Ströme in Elektroanlagen und Gebäuden, »de« 13-14/2004, S. 47 ff.

Buch zum Thema
 Schmolke, Chun, Soboll, Walfort: Elektromagnetische Verträglichkeit in der Elektroinstallation, ISBN 978-3-8101-0222-5, www.de-online.info

elektrischen Zusammenhänge die beste vorbeugende Maßnahme für das reibungslose Zusammenwirken der eingesetzten Technik.

Quellenangaben und weiterführende Informationen

- DIN VDE 0100-300, Ausgabe Januar 1996, Teil 3: Bestimmungen allgemeiner Merkmale (IEC 364-3: 1993, modifiziert), deutsche Fassung HD 384.3 S2: 1995
- DIN VDE 0800 Teil 2-310, Ausgabe September 2001, Anwendung von Maßnahmen für den Potentialausgleich und Erdung in Gebäuden mit

Einrichtungen der Informationstechnik

- DIN VDE 0100-410:2007-06, Teil 4-41: Schutzmaßnahmen gegen elektrischen Schlag
- DIN VDE 0100-510:2007-06, Teil 5-51: Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Allgemeine Bestimmungen
- DIN VDE 0100-540:2007-06 »Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel – Erdungsanlagen, Schutzleiter und Schutzpotentialausgleichsleiter«
- EN 60445:2007 (VDE 0197) (November 2007) Grund- und Sicherheitsregeln für die Mensch-Maschine-Schnittstelle – Kennzeichnung der Anschlüsse elektrischer Betriebsmittel und angeschlossener Leiterenden
- Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Geräten (EMVG) vom 18. September 1998, Erster Abschnitt, Allgemeines §§ 1 und 2
- DIN EN 61000-2-4, Mai 2003: Festlegungen zu Verträglichkeitspegel für Oberschwingungen in der Gebäudeinstallation.

Gerhard Budde,
freier Autor, Lennestadt

Gibt es bei Kurzschluss Kleinholz?

Unterschätzte Auswirkungen beim nicht auszuschließenden Kurzschluss eines Notstromaggregats

In der Praxis werden oft aus Unkenntnis oder Bequemlichkeit Beanspruchungen bei Generatorkurzschluss unterschätzt. Am Beispiel aus der Praxis des Autors wird ein konkreter Fall analysiert. Dem besseren Verständnis dient hier die Skizze eines Generatorschalters in einpoliger Darstellung (Bild).

Für ein Bürogebäude wurde vom Planer gemäß der DIN VDE 0108 zur Versorgung von sicherheitsrelevanten elektrischen Verbrauchern ein Notstromaggregat mit einer Bemessungsscheinleistung von 160kVA vorgesehen. Der mit der Ausführung der kompletten Gebäudeelektroinstallation beauftragte Errichter bestellte das Notstromaggregat bei einer und die Notstromautomatik sowie den Generatorschalterschrank bei einer anderen Firma.

Abweichungen von der Planung

Bedingt durch gewisse Umstände lieferte der Notstromaggregatlieferant ein leistungsfähigeres Stromerzeugungsaggregat mit einer Bemessungsscheinleistung von 250kVA. Da es keine Abstimmung miteinander gab, lieferte die Steuerungsfirma die Notstromsteuerung und den Generatorschalterschrank mit dem Generatorschalter, der für die Scheinleistung von 160kVA bemessen wurde.

Die Anlage wurde abgenommen und ging in Betrieb, ohne dass die Diskrepanz zwischen dem Generator bzw. dem Aggregat und dem Generatorschalter entdeckt wurde.

Zweieinhalb Jahre später wurde gemäß der DIN VDE 0108 (für bauliche Anlagen für Menschenansammlungen) der rechnerische Nachweis der selektiven Abschaltung für die allgemeine Stromversorgung und für die Sicherheitsstromversorgung gefordert.

Oft kommt erst Jahre später heraus, dass Anlagen nicht entsprechend ihrer ursprünglichen Planung errichtet wurden. Hier schlummert latente Gefahr, die es zu beseitigen gilt. Der Beitrag befasst sich mit einem konkreten Fall aus der Praxis.

Es wurde also dann eine Netzbe- rechnung (Lastfluss, Überlast, Kurz- schluss, automatische Abschaltung der Stromversorgung und Spannungs- fall) durchgeführt und Selektivitäts- betrachtungen angestellt.

Ergebnisse der nachträglichen Berechnung

Hier einige Berechnungsergebnisse, bezogen auf den Generatorschalter:

- Kurzschlüsse an der Einbaustelle des Generatorschalters sind wegen der »elektrischen« Nähe zum Generator generatornahe Kurzschlüsse.
- Die Kurzschlussströme enthalten zusätzliche Wechselstromkomponenten, die nach einigen Hundert ms exponential abklingen.
- Die größten Kurzschlussströme sind bei einpoligem Kurzschluss zu erwarten.

Zur Überprüfung bzw. zum Nachweis der thermischen Kurzschlussfestigkeit des Generatorschalters wurde der thermisch gleichwertige Kurzschlussstrom I_{th} herangezogen.

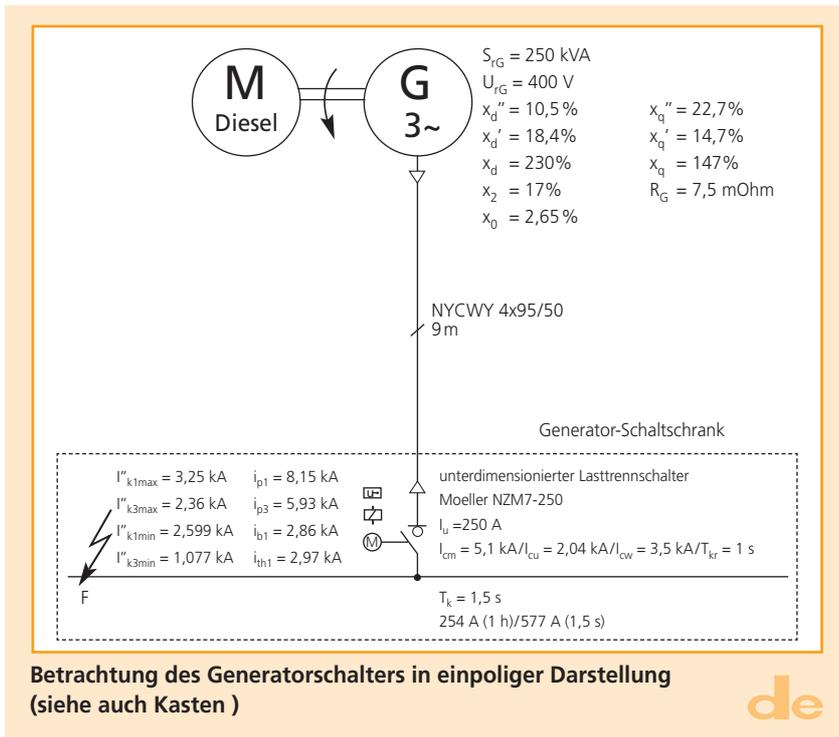
Der Wert von I_{th} ist der Effektivwert des Stromes mit der gleichen thermischen Wirkung und der gleichen Dauer wie der tatsächliche Kurzschlussstrom, der einen Gleichstromanteil enthalten und im Verlauf der Zeit abklingen kann.

Die Überprüfung der thermischen Kurzschlussfestigkeit ergab, dass die thermische Bemessungs-Kurzschlussfestigkeit des Generatorschalters leicht von der zu erwartenden thermischen Wirkung des Kurzschlussstromes überstiegen ist.

Zur Überprüfung bzw. zum Nachweis der dynamischen Kurzschlussfestigkeit des Generatorschalters wurde der Stoßkurzschlussstrom i_p herangezogen (i_p ist der maximal mögliche Augenblickswert des zu erwartenden Kurzschlussstromes und der erste Spitzenwert nach dem Eintritt des Kurzschlusses).

Ein Kurzschluss kann verheerende Folgen haben

Die Überprüfung der dynamischen Kurzschlussfestigkeit ergab, dass die dynamische Bemessungs-Kurzschlussfestigkeit (Bemessungsstoßstromfestigkeit) des Generatorschalters deutlich unter der zu erwartenden mechanischen Wirkung des Kurzschlussstromes liegt. Der Stoßkurzschlussstrom einpolig und dreipolig übersteigt deutlich das Bemessungskurzschlusseinschaltvermögen des Generatorschalters. Das Bemessungsgrenzkurzschlussausschaltvermögen des Generatorschalters ist größer als der Ausschaltwechsel- bzw. Dauerkurzschlussstrom bei einem dreipoligem Fehler. Das Bemessungsgrenzkurzschlussausschaltvermögen des Generatorschalters ist wiederum kleiner als der Ausschaltwechselstrom bzw. Dauerkurzschlussstrom bei einpoligem Fehler. ***Es ist daher davon auszugehen, dass der Generatorschalter bei einem einpoligen Kurzschluss an seiner Einbaustelle Schaden erleiden und den Kurzschluss nicht abschalten kann.***



Die Kurzschlussstromberechnung wies eindeutig eine Unterdimensionierung des Generatorschalters nach. Der Netzberechner schlug den Austausch des Generatorschalters vor. Daraufhin bestellte der Errichter einen Sachverständigen. Dieser stellte zwar fest, dass das gelieferte Notstromaggregat eine Leistung von 250 kVA aufwies und der Generatorschalter nicht an die erhöhte Leistung angepasst wurde. Trotz wesentlich größerer Leistung (250 kVA > 160 kVA) meinte er aber, man könne den Generator durch geeignete Einstellung des Generatorschalters hinsichtlich des Generator Kurzschlussbetriebs doch den Generatorschalter nicht gefährden. Daraufhin ordnete er an, lediglich die Leistung auf dem Leistungsschild von 250 kVA »auf die vertraglich geschuldete Leistung« von 160 kVA abzuändern.

Merkmale von Stromerzeugungsaggregaten

Im Inselbetrieb eines Notstromaggregats herrscht keine Frequenz- bzw. Spannungs Konstanz, wie etwa bei der Versorgung aus dem öffentlichen Netz. Die Lasten bzw. die großen Laständerungen werden im Verbundnetz auf viele Synchrongeneratoren einspeisender Kraftwerke im Verbundbetrieb aufgeteilt. Die Einhaltung einer hohen Frequenzstabilität sowohl im stationären als auch im dynamischen Betrieb im

Verbundnetz ist dadurch meistens problemlos möglich.

Der Antriebsmotor eines Notstromaggregates hingegen arbeitet allein im Inselbetrieb und wird bezüglich seiner Bemessungsleistung großen Laständerungen ausgesetzt. Unter diesen Bedingungen kommt es besonders beim Motor, der zur Leistungssteigerung mit einem Abgasturbolader ausgestattet ist, zu massiven Frequenzschwankungen. Der Antriebsmotor dreht sich bei starken Laständerungen somit nicht mehr mit einer konstanten Kreisgeschwindigkeit (Drehzahl).

Im Verbundnetz steht eine sehr große Kurzschlussleistung zur Verfügung, z.B. 50 GVA auf der 380-kV-Ebene, 5 GVA auf der 110-kV-Ebene, 500 MVA auf der 10-kV-Ebene und bis zu 50 MVA auf der 400-V-Ebene. Die Kurzschlussleistung wird im NS-Netz entsprechend der Innenimpedanz des einspeisenden Transformators begrenzt.

Ein Verteilungstransformator mit 10/0,4 kV, 50 Hz, 1000 kVA, 6%, hat eine Kurzschlussleistung, die ca. dem 17,3-fachen seiner Bemessungscheinleistung entspricht. Eine Laständerung bis zu seiner Bemessungscheinleistung ruft einen Spannungsfall an seiner Innenimpedanz bis maximal 6% der Bemessungsspannung hervor.

Ein Synchrongenerator (400 V, 50 Hz, 1000 kVA, 12%/5%/145%) eines Notstromaggregats weist eine Kurz-

schlussleistung auf, die ca. dem 8,8- bzw. 10,1-fachen seiner Bemessungscheinleistung entspricht. Diese Kurzschlussleistung bleibt aber nicht konstant, sondern sinkt schnell auf eine Kurzschlussleistung ab, die ca. dem Drei- bis Fünffachen seiner Bemessungscheinleistung entspricht. Laständerungen bis zur Bemessungscheinleistung des Synchrongenerators bewirken einen transienten Spannungsfall an seiner Innenimpedanz in Abhängigkeit vom Lastwinkel von 12% und mehr der Bemessungsspannung.

Die Stromerzeugungsaggregate reagieren sehr empfindlich auf starke Laständerungen. Im transienten Zeitfenster verursacht jede Laständerung einen vorübergehenden transienten Spannungsfall. Da die Generatorresistenz wesentlich kleiner als die transiente Generatorreaktanz ist, gilt der transiente Spannungsfall im Generator beim Zuschalten eines Asynchronmotors bezüglich der hohen Motorreaktanz als besonders kritisch. Der hohe transiente Spannungsfall im Generator kann vorhandene Steuerungsschütze zum Ausfall bringen. So etwas kann z.B. bei der Zuschaltung einer Sprinkleranlage passieren. Die Spannung wird vom Spannungsregler beeinflusst und geregelt.

Turboloch des Antriebsdiesels berücksichtigen

Als Antriebsmotor wird heute überwiegend ein Dieselmotor verwendet. Da er, wie oben erwähnt, üblicherweise zur Leistungssteigerung und Verringerung seiner Abmessungen, mit einem Abgasturbolader versehen ist, hat er eine dominante Schwäche, die in der Fachnomenklatur als Turboloch bezeichnet wird.

Ein Turbolader hängt nämlich vom eigenen Abgasvolumenstrom ab. Dieser ist aber im Leerlauf des Motors z.B. nach automatischem Hochlauf des Aggregates und vor der Lastübernahme gering. So kann dann auf den leer laufenden aufgeladenen Motor nur seine Saugmotorleistung (Leistung, die der Motor ohne Turbolader hat) aufgeschaltet werden. Der Motor kann seine volle mechanische Bemessungsleistung an der Welle – am Synchrongenerator – also nur stufenweise abgeben. Übersteigt die aus sicherheitsrelevanten Gründen in einer Stufe erforderliche zuzuschaltende Leistung seine reine Saugleistung, muss er überdimensioniert

VERHALTEN BEI KURZSCHLUSS

Hier Schlussfolgerungen zu den im Bild auf S. 46 dargestellten Verhältnissen:

- $I_{Cu} > I_{d3}$
- $I_{Cu} < I_{d1}$
- $I_{Cm} \ll I_{p1}$
- $I_{Cm} < I_{p3}$
- $I_{Cv}(1,5s) < I_{th}$

1) Das Bemessungskurzschlussausschaltvermögen des Generatorschalters ist größer als der Dauerkurzschluss- bzw. Ausschaltwechselstrom bei einem dreipoligen Fehler.

2) Das Bemessungskurzschlussausschaltvermögen des Generatorschalters ist kleiner als der Dauerkurzschluss- bzw. Ausschaltwechselstrom bei einem einpoligen Fehler.

3) Die zu erwartende thermische Wirkung des Kurzschlussstroms übersteigt leicht die thermische Bemessungskurzschlussfestigkeit des Generatorschalters.

4) Die zu erwartende mechanische Wirkung des Kurzschlussstroms übersteigt deutlich die thermische Bemessungskurzschlussfestigkeit des Generatorschalters.

nirt werden. Das ist bei der Planung zu berücksichtigen.

Wie oben erwähnt, ist die Kurzschlussleistung eines Synchrongenerators wesentlich kleiner als die Kurzschlussleistung eines leistungsgleichen Transformators. Der Kurzschlussstromverlauf ist durch die im Generator auftretenden elektromagnetischen Vorgänge zeitlich veränderlich. Es treten nach Kurzschlussbeginn komplizierte Ausgleichsvorgänge zwischen Stator-, Rotor- und Erregerwicklung ein. Diese Vorgänge werden mathematisch durch ein Anwachsen der Generatorreaktanzen (zeitlich veränderliche Generatorreaktanzen einschließlich der zugehörigen Zeitkonstanten) modelliert. Nach Eintritt des Kurzschlusses fließt der relativ hohe Anfangskurzschlusswechselstrom I''_k , der sich nach ca. 20ms bis 30ms verkleinert und in den transienten Kurzschlussstrom übergeht I'_k , und dieser klingt nach einigen 100ms auf den von der Synchronreaktanzen bestimmten Dauerkurzschlussstrom I_k ab. Diese typischen Kennzeichen treten vor allem bei Generator клемменkurzschlüssen in Erscheinung.

Verhalten bei generatornahem Kurzschluss

Tritt ein Kurzschluss in der »elektrischen« Nähe des Generators ein, so überwiegt der Reaktanzanteil (Blindwiderstandsanteil), bedingt durch die relativ große Generatorreaktanzen an der Kurzschlussimpedanz. Der Kurzschlussstrom verhält sich überwiegend induktiv und eilt der treibenden Spannung nach. Das Notstromaggregat muss eine überwiegend induktive Kurzschlussleistung liefern. Diese wird von der Erregerwicklung erzeugt. Der Antriebsmotor wird plötzlich entlastet und kann mit

einem kräftigen Drehzahlanstieg reagieren, was natürlich hohe Anforderungen an die Drehzahlüberwachungs- bzw. Drehzahlregelungseinrichtung stellt.

Ist ein Kurzschluss elektrisch weit entfernt, herrschen in der Kurzschlussbahn Resistanzanteile (Wirkwiderstandsanteile) der Kurzschlussimpedanz vor – bedingt durch kleinere Leiterquerschnitte der Kabel. Die Kurzschlussleistung, als überwiegende Wirkleistung, kann nicht mehr von der Erregerwicklung bereitgestellt werden. Sie muss jetzt vom Antriebsmotor erzeugt werden, der im Extremfall bei einem ungünstigen Kurzschlusswinkel zum Stillstand abgebremst werden kann, so dass die Drehzahlüberwachung das Aggregat abschaltet. Zur Aufrechterhaltung der Sicherheitsstromversorgung darf so etwas natürlich nicht passieren. Es ist erforderlich, den Kurzschluss so schnell wie möglich – aber unbedingt selektiv – abzuschalten.

EMV-Probleme hinsichtlich der eventuell vorhandenen Oberschwingungsbelastung können durch ein ausreichend großes Verhältnis zwischen der Kurzschlussleistung am Anschlusspunkt und der Leistung der einzuspeisenden überschwingungserzeugenden Verbrauchermittellast begrenzt werden. Bei einem Verhältnis $> 1000:1$ – z. B. bei Parallelbetrieb mehrerer Transformatoren – sind keine EMV-Probleme zu erwarten.

Da – wie schon erläutert – ein Synchrongenerator eines Notstromaggregats im Inselbetrieb wesentlich geringere Kurzschlussleistung liefert und eine Reduzierung der nicht linearen Last oft nicht möglich ist (gewisse Verbraucher werden für spezielle SV-Anwendungen unbedingt benötigt), fällt hier dieses Verhältnis unter $100:1$, im Extremfall sogar unter $10:1$. Somit

entstehen im Generatorbetrieb unzulässig hohe Oberschwingungsverträglichkeitspegel (nach EN 50160 bzw. EN 61000-2-4) und Störungen, die im Netzbetrieb wegen der großen Netz-Kurzschlussleistung nicht auftreten und unentdeckt bleiben.

Auswahl des Schutzorgans im Generatorschalterschrank

1) Bei kleineren Generatorleistungen wird oft ein Leistungsschütz für die Realisation der Notstromumschaltmikromatik eingesetzt.

2) Für größere Generatorleistungen verwendet man Leistungsschalter. Diese Variante ist für den anspruchsvolleren Parallelbetrieb Netz – NEA kurzschlusschutzmäßig sicherer. Die Auslösekennlinien (AMZ) von Leistungsschaltern sind aber nur bedingt für die selektive Abschaltung im Generatorkurzschlussbetrieb geeignet. Das trifft besonders zu, wenn es SV-Abgänge gibt, die mit Schmelzsicherungen abgesichert werden, deren Bemessungsströme verhältnismäßig groß zum Bemessungsstrom des Leistungsschalters sind. Oder wenn Kurzschlusszeiten > 1 s betragen sollen.

3) Viel günstiger für die selektive Abschaltung sind Auslösekennlinien von Sekundärrelais mit Überstromauslösung (Überstromzeitrelais). Diese Relais gewährleisten eigentlich einen unabhängigen Überstromzeitschutz (UMZ), bei dem die eingestellte Zeitverzögerung von der Höhe des Kurzschlussstroms unabhängig ist. Aus diesem Grund wird dann ein Lasttrenn- bzw. Leistungstrennschalter verwendet. Dieser Schalter ist eine Ableitung aus dem Leistungsschalter. Er weist keinen Überstromauslöser auf, verfügt über Schaltschloss und Lichtbogenlöschkammer und kann in der Regel nur kleinere Kurzschlussströme abschalten. Der Schalter ist mit einem Arbeitsstrom- oder einem Unterspannungsauslöser ausgestattet und somit durch ein externes Sekundärrelais mit Überstromauslösung (Überstromzeitrelais) fernsteuerbar. Da die Kurzschlussfestigkeiten (thermische und dynamische) sowie das Ein- bzw. Ausschaltvermögen dieses Lasttrenn- bzw. Leistungstrennschalters wesentlich kleiner im Vergleich zum Leistungsschalter sind, musste seine Verwendung als Generatorschalter in unserem Beispiel fachlich sorgfältig untersucht werden.

Hätte sich in diesem Praxisbeispiel an der Stelle des Generatorschalters ein

Leistungsschalter mit dem gleichen Bemessungsstrom von 250A befunden, wäre es auch kein Problem gewesen, ihn entsprechend einzustellen. Denn dessen Kurzschlussfestigkeiten und Schaltvermögen übersteigen bei weitem die zu erwartenden Kurzschlussbeanspruchungen im Generatorkurzschlussbetrieb.

Besonders kritisch für einen Lasttrennschalter (Leistungstrennschalter) beim Einsatz als Generatorschalter ist der Parallelbetrieb Netz/NEA. Selbst wenn dieser Schalter dem Generatorinselkurzschlussbetrieb genügt, muss überprüft werden, ob der Schalter den Kurzschlussbeanspruchungen des Parallelbetriebs Netz/NEA standhalten kann.

Fazit

Eine oberflächliche Herangehensweise bei der Planung und Errichtung von elektrischen Anlagen führt zu gefährlichen Unterdimensionierungen bzw. zu unnötig teuren Überdimensionierun-



MEHR INFOS:

Buch zum Thema

Uhlig, H.-P., Sudkamp, N.: Elektrische Anlagen in medizinischen Einrichtungen, ISBN 978-3-8101-0206-5, www.de-online.info

Fachbeiträge zum Thema

- Sofic, D.: Stromkreisnachrüstung an bestehenden Hauptverteilungen, »de« 15-16/2007, S. 32 ff.
- Sofic, D.: Zentrales ZSV-Netz im Batteriebetrieb, »de« 23-24/2006, S. 50 ff.

- Kasikci, I: Kurzschlussberechnung in Drehstromnetzen, sechsteiliger Fachbeitrag in den »de«-Ausgaben, 4/2003, S. 32 ff., 5/2003, S. 50 ff., 7/2003, S. 54 ff., »8/2003, S. 36 ff., 10/2003, S. 46 ff. und 12/2003, S. 49 ff.

Link zum Thema

- Dossier zum Thema Planung: www.de-online.info/fachthemen/elektroinstallation/Planung

gen von elektrischen Anlagen. Dasselbe gilt bei der Prüfung von elektrischen Anlagen: Oberflächlichkeit ermöglicht das Bestehenbleiben von falsch ausgelegten elektrischen Anlagen.

Um das zu vermeiden, empfiehlt sich schon in der Planungsphase bzw. spätestens bei der Errichtung, entsprechende Netz- bzw. Kurzschlussstromberechnungen und Selektivitätsbetrachtungen – mit Fachkenntnis – durchzuführen. Es

sollte nicht vergessen werden, dass selbst die beste Berechnungssoftware (und es gibt keine, die alle erforderlichen Merkmale abdeckt) nur ein Hilfsmittel ist, und nicht etwa eine ggf. mangelnde Fachkompetenz des Planers ersetzen kann.

Dragan Sofic, EAB Elektroanlagenbau Rhein Main GmbH, Neu-Isenburg